

# 新型高准确度光纤光栅压力传感系统\*

胡志新<sup>1,2</sup> 朱 军<sup>2</sup> 张 陵<sup>1</sup>

(1 西安交通大学建力学院, 西安 710049)

(2 长安大学工程机械学院, 西安 710061)

**摘 要** 提出一种使用光纤双布喇格光栅测定压力的测量方法. 在外界压力作用下, 传感光纤布喇格光栅反射波长的漂移, 被转变成在交变力策动下, 发生弯曲的等强度悬臂梁调制扫描光栅反射光脉冲间隔的变化. 实验结果表明, 光纤布喇格光栅反射波长漂移的测量范围为 0~3 nm, 波长测量的不确定度为 1 pm; 压力传感器的量程为 0~6 MPa 时, 压力的测量不确定度为 0.005 MPa.

**关键词** 光纤光学; 光纤布喇格光栅; 动态解调; 压力测量

**中图分类号** TN25 **文献标识码** A

## 0 引言

在实验室内, 利用光纤光栅测量外界压力、温度、位移、电流、磁场、流量等物理参量时, 直接或间接引起光纤光栅轴向拉伸或压缩, 使其反射波长发生漂移<sup>[1~4]</sup>. 传统传感系统使用宽带、合适功率的光源及昂贵的光谱分析仪对光栅的反射光谱进行测量, 从波长漂移与所测物理量之间的关系再求得该物理量值. 光纤光栅反射波长漂移的测量技术, 已有诸多涉及滤波调谐技术的报道<sup>[5~7]</sup>, 如用 F-P 滤波器对光纤光栅的反射波进行滤波调谐, 用多个光纤光栅波长匹配进行滤波调谐等. 本文提出一种采用动态调制的方法, 即周期性上下弯曲等强度悬臂梁, 以周期性拉伸扫描光栅, 引起该光纤光栅反射谱的周期性漂移来调谐待测参量. 通过对解调后的时序脉冲间隔变化的实时检测, 最终实现对外界压力变化的检测. 实验结果验证了这种方法的可行性.

## 1 基本原理

实验装置如图 1. 由宽带光源(BBS)发出的光经 3 dB 耦合器 Coupler<sub>1</sub> 后入射到传感光栅, 经反射后的光谱再经耦合器 Coupler<sub>2</sub> 入射到扫描光栅中. 当传感光栅的中心波长与扫描光栅的中心波长相等时, 扫描光栅的反射光达到最大值, 再经耦合器 Coupler<sub>2</sub> 后, 光电探测器 PD 就会接收到光脉冲强度最大的光信号. 在电机带动凸轮旋转时, 可周期性地使悬臂梁发生交变的上下弯曲, 调制悬臂梁使得扫描光栅周期性地沿轴向被拉伸和被压缩. 因此, 使得该光栅反射波长位置周期性变化, 这样周期性变化的光波输入光电探测器 PD 后, 就被转换为

电压序列脉冲信号. 压力传感器的原理如图 2, 当被测外压力等于零时, 电压脉冲信号的峰值被标定为起始点; 当被测压力施加在薄壁压力筒内壁时, 传感光栅反射波长发生漂移, 而由扫描光栅反射出的波峰相对位置发生移动, 进而光电探测器中的转换电压序列脉冲峰值发生相对移动, 若用时序脉冲, 则形成脉冲的时间间隔. 可由计算机采集并计算出该时序脉冲的时间间隔变化, 或由存储示波器测出该电脉冲的时间间隔变化, 经相关的数据处理从而得出待测压力的量值. 实验中, 所用的传感光栅和扫描光栅的参量完全相同. 当受压力和温度同时作用时, 其反射波长将发生漂移. 反射波长的漂移量与

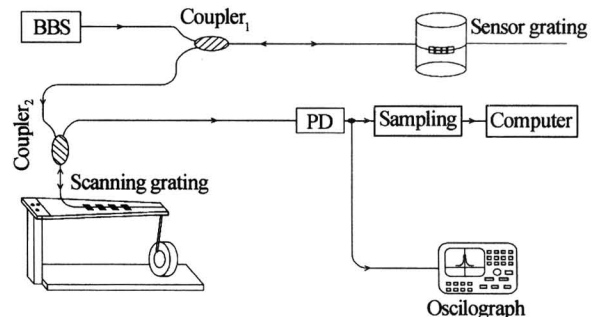


图 1 实验原理

Fig. 1 Principle diagram of experimental set-up

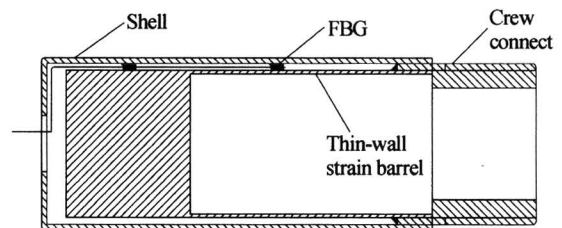


图 2 光纤光栅压力传感器原理

Fig. 2 Principle diagram of fiber grating pressure sensor  
压力和温度的关系式<sup>[1]</sup>为

$$\frac{\Delta\lambda}{\lambda} = (1 - p_e)\epsilon + (\alpha + \xi)\Delta T \quad (1)$$

式中,  $\epsilon$  为光栅轴向应变;  $\Delta T$  为温度变化量;  $p_e$  为有

\* 陕西省自然科学基金(2000C34)资助项目  
Tel: 029-87758038 Email: hzx1965@163.com  
收稿日期: 2006-04-10

效弹光系数;  $\alpha$  和  $\xi$  分别为光纤光栅热胀系数和热光系数. 若温度不变时, 只考虑外力  $p$  作用, 则在光纤光栅上产生的轴向应变<sup>[6]</sup>为

$$\varepsilon_1 = \frac{pd_0}{2Eh} \left[ 1 - \frac{1}{2}\mu \right] \quad (2)$$

式中, 令  $k_1 = \frac{d_0}{2Eh} (1 - 0.5\mu)$ ,  $\mu$  为应变筒材料的泊松比;  $d_0$  为筒的内径;  $h$  为壁厚;  $E$  为筒材料的弹性模量.

对于扫描光栅, 由于受凸轮旋转机构的调制, 被调谐的轴向应变为

$$\varepsilon_2 = k_2 F_0 \cos(1 + \omega t) \quad (3)$$

式中,  $k_2 = \frac{6l}{bh_1^2}$ ;  $F_0$  为作用在悬臂梁上的调制力的幅值;  $\omega$  为调制力的角频率;  $l$  为梁的长度;  $h_1$  为梁的厚度;  $b$  为梁固定端的宽度. 在假定两个光纤光栅受温度完全相同且波长漂移可忽略的状况下, 自由波长为  $\lambda_0$  时, 两波长漂移之差为

$$\lambda_2 - \lambda_1 = \Delta\lambda_2 - \Delta\lambda_1 = (1 - P_e)(k_2 F_0 \cdot \sin \omega t + k_2 F_0 - k_1 p_1) \lambda_0 \quad (4)$$

可以将两光纤光栅的反射光波看作反射光强随波长变化服从高斯分布, 其反射率可写为

$$R(\lambda) = R_0 \exp \left\{ - \left[ 4 \ln 2 \frac{(\lambda - \lambda_{1,2})^2}{\Delta\sigma^2} \right] \right\} \quad (5)$$

因此, 光纤光栅的反射光强随波长的分布为

$$I(\lambda) = I_0 \exp \left\{ - \left[ 4 \ln 2 \frac{(\lambda - \lambda_{1,2})^2}{\Delta\sigma^2} \right] \right\} \quad (6)$$

光强功率值  $N_R$  为

$$N_R = \int_{-\infty}^{\infty} I(\lambda) R_2(\lambda) d\lambda = I_0 R_0 \frac{\sqrt{\pi}}{2 \sqrt{2 \ln 2}} \times \Delta\sigma \exp \left[ 2 \ln 2 \frac{(\lambda_2 - \lambda_1)^2}{\Delta\sigma^2} \right] \quad (7)$$

将式(4)代入式(7), 得

$$N_R = P_0 \Delta\sigma \exp \left[ -2 \ln 2 (1 - p_e)^2 \times \frac{(k_2 F_0 \sin \omega t + k_2 F_0 - k_1 p)^2 \lambda_0^2}{\Delta\sigma^2} \right] \quad (8)$$

当在传感光栅上所施加不同的压力时, 通过式(8)可以计算出压力  $p$  与一个周期内 2 次光脉冲的时间间隔  $\tau$  的关系为

$$p = \frac{k_2 F_0}{k_1} \left[ 1 - \cos \left[ \frac{1}{2} \omega t \right] \right] \quad (9)$$

## 2 实验结果与分析

实验中, 传感光纤光栅的自由波长为 1538.456 nm. 实验所用的光源为 SLED 宽带光源, 其中心波长为 1540 nm, 光谱平坦区间为 1510 ~ 1570 nm, 输出功率为 300  $\mu$ W, 能满足光纤光栅波长漂移的最大范围

要求. 当压力筒内压  $p=0$  MPa 时, 其反射波长为 1538.456 nm, 谱线宽为 0.20 nm; 当压力筒内压  $p=6$  MPa 时, 反射波长移到 1540.286 nm, 谱线宽为 0.20 nm. 由此看出谱线宽无明显展宽. 因此, 式(8)基本为一定值. 此时, 反射波长偏移了 2.134 nm, 从理论上求得  $k_1=0.37$  nm/MPa,  $k_2=28$   $\mu$ ε/N. 实验中, 在悬臂梁自由端上所加的最大策动力为 80 N, 扫描频率为 10 Hz, 扫描光栅的反射波长扫描范围为 0~3 nm. 示波器上观察到的电压序列脉冲的周期为 99.984 ms 与理论值相符. 由存储示波器可观察到, 传感器上压力载荷的大小与探测器输出电压脉冲序列的时间间隔关系(如图 3). 实验测得的压力值大小与电压脉冲间隔有对应的关系, 如图 3, 压力增加 1.5 MPa 时测得电压脉冲时间间隔比增大了 20.132 ms.

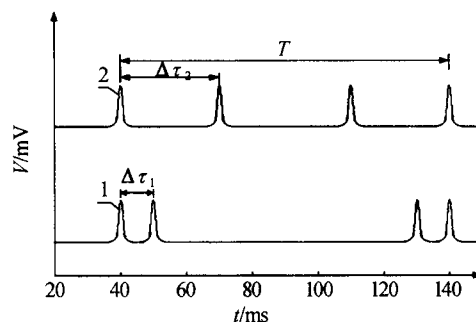


图 3 压力变化与探测器输出电压脉冲时间间隔关系  
Fig. 3 Pressure variation versus voltage pulse time interval outputted by detector

用计算机数据采集系统采集到的光脉冲时间间隔, 由标准压力表检测出压力筒内压力  $p$  值, 可作出如图 4 的定标曲线, 也可由存储示波器测出压力筒内压力所对应的脉冲时间间隔, 再由式(9)计算出压力值. 经计算与分析, 发现在压力为 0~6 MPa 的范围内, 实验结果与理论计算结果十分吻合(见图 4).

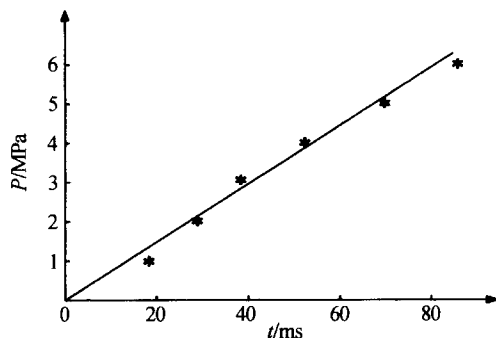


图 4 压力与电压脉冲序列时间间隔曲线  
Fig. 4 Pressure versus time interval of voltage pulse sequence

因此, 该系统完全可以通过测量光脉冲时间间隔  $\tau$ , 间接测定外压力  $p$  值. 误差分析表明, 测量不确定度可达到 0.005 MPa.

### 3 结论

本文提出了一种利用传感光纤光栅与调制扫描光纤光栅实现测量外压力的动态解调方法. 基本设计思想在于, 它将外压力下的压力传感光栅反射波长漂移转变成从另一个被周期策动等强度悬臂梁上下弯曲来调制的光栅反射的光脉冲时间间隔变化. 测定外压力在 0~6 MPa 范围内时, 可实现 0.005 MPa 的测量不确定度, 同时该系统可用于更高压力的测量环境. 该系统的优点: 1) 测量准确度高, 具有动态和静态的检测功能; 2) 可由单片机等组成检测系统, 替代昂贵的光谱分析仪; 3) 可组成光纤光栅压力传感器阵列, 实现多点压力的同时在线测量.

#### 参考文献

- Morey W W. Recent advances in fiber grating sensors. *SPIE*, 1996, **2594**: 90~98
- Morey W W, Meltz G. Fiber optic Bragg grating sensors. *SPIE*, 1989, **1169**: 98~107
- 孙安, 乔学光, 贾振安. 耐高压光纤 Bragg 光栅压力传感技术研究. *光子学报*, 2004, **33**(7): 823~825  
Sun A, Qiao X G, Jia Z A. *Acta Photonica Sinica*, 2004, **33**(7): 823~825
- 詹亚歌, 蔡海文, 耿建新, 等. 吕槽封装光纤光栅传感器的增敏特性研究. *光子学报*, 2004, **33**(8): 952~955  
Zhan Y G, Cai H W, Geng J X, et al. *Acta Photonica Sinica*, 2004, **33**(8): 952~955
- Pereira D A, Santos J L. Fiber Bragg grating sensing system for simultaneous measurement of salinity and temperature. *Optical Engineering*, 2004, **43**(2): 299~304
- Rao Y J, Jackson D A. Extended dynamic range detection system for in-fiber Bragg grating strain sensors based on two cascaded interferometric wavelength scanners. *Meas Sci Technol*, 1997, (8): 1043~1049
- Pran K, Havsgard G B. Wavelength multiplexed fibre Bragg grating system for high-strain health monitoring applications. *Meas Sci Technol*, 2002, (13): 471~476

## A New Type of Fiber Grating Pressure Sensing System with High Accuracy

Hu Zhixin<sup>1,2</sup>, Zhu Jun<sup>2</sup>, Zhang Jun<sup>1</sup>

<sup>1</sup> School of Aerospace, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049)

<sup>2</sup> Construction Machinery School of Chang'an University, Xi'an 710061)

Received date: 2006-04-10

**Abstract** In order to improve the accuracy of fiber Bragg grating (FBG) pressure sensor and decrease the cost of the whole system, a measuring method of using the fiber Bragg dual-grating to measure the pressure is proposed in this paper. Under the action of external pressure, the reflected wavelength drift of the sensing FBG is transformed into time interval variation of light pulse reflected by a scanning grating, which is modulated by means of driving the equally intense cantilever beam into up and down bending periodically. The experimental result shows that the detecting range for the reflected wavelength drift of FBG is 0~3 nm, the uncertainty of wavelength detection is 1 pm, and the uncertainty of the pressure measurement is 0.005 MPa when the measurement range of the pressure sensor is 0~6 MPa.

**Keywords** Fiber optics; Fiber Bragg Grating (FBG); Dynamic demodulation; Pressure measurement

**Hu Zhixin** received his Master's degree in March 1995 from Nanjing University of Science & Technology, China, and now he is studying for a doctorate at Xi'an Jiaotong University and working as a teacher in Chang'an University, China. His research interests are some testing and fiber sensing technologie.

